



Ημερίδα Ερευνητικού Προγράμματος **ΔΕΥΚΑΛΙΩΝ**  
*«Εκτίμηση πλημμυρικών ροών στην Ελλάδα σε  
συνθήκες υδροκλιματικής μεταβλητότητας: Ανάπτυξη  
φυσικά εδραιωμένου εννοιολογικού-πιθανοτικού  
πλαισίου και υπολογιστικών εργαλείων»*  
Τετάρτη 2/7/2014, Μουσείο Γουλανδρή Φυσικής  
Ιστορίας

## **Προσαρμογή περιοχικών υδρολογικών σχέσεων στις Ελληνικές λεκάνες**

**Ανδρέας Ευστρατιάδης, Δρ. Πολιτικός Μηχανικός, ΕΔΙΠ ΕΜΠ**





# Η χρήση των περιοχικών σχέσεων και μοντέλων στην υδρολογία πλημμυρών

---

- Βασίζονται στην (αμφισβητούμενη) υπόθεση της **υδρολογικής ομοιότητας** των λεκανών απορροής.
- Πρόκειται για **ημιεμπειρικές προσεγγίσεις** που εκτιμούν τα υδρολογικά μεγέθη ενδιαφέροντος μέσω εύκολα μετρήσιμων φυσιογραφικών χαρακτηριστικών της λεκάνης (π.χ. γεωμετρικά μεγέθη).
- Τα μεγέθη αυτά εκτιμώνται είτε μέσω **αναλυτικών σχέσεων** (π.χ. εξισώσεις παλινδρόμησης) είτε με χρήση **πινάκων αναφοράς**.
- Κατά κανόνα, η προσαρμογή των περιοχικών σχέσεων έχει γίνει με βάση μετρήσεις πεδίου σε περιορισμένο πλήθος **πειραματικών λεκανών του εξωτερικού**, με συγκεκριμένα φυσιογραφικά και υδροκλιματικά χαρακτηριστικά.
- Παρά την ευρεία αποδοχή τους, σε λίγες περιπτώσεις έχει γίνει **επαλήθευση** (και αναπροσαρμογή) των εν λόγω σχέσεων στις τοπικές συνθήκες.
- Στην **υδρολογία πλημμυρών**, η χρήση τους είναι προσφιλής, καθώς μέσω αυτών εκτιμώνται οι **παράμετροι των μοντέλων επεισοδίου** που αποτελούν το βασικό εργαλείο σχεδιασμού σε **λεκάνες χωρίς μετρήσεις**.



# Προσαρμογή περιοχικών σχέσεων στις Ελληνικές λεκάνες: Μεθοδολογικό πλαίσιο έργου «Δευκαλίων»

---

- Λεπτομερής διερεύνηση της πλέον διαδεδομένης πρακτικής υδρολογικού σχεδιασμού, που βασίζεται στη συνδυαστική εφαρμογή της μεθόδου του **αριθμού καμπύλης απορροής** (Runoff Curve Number) της Soil Conservation Service (SCS, 1972) και του **συνθετικού μοναδιαίου υδρογραφήματος** (ΣΜΥ).
- Κριτική επισκόπηση του εννοιολογικού υποβάθρου των μοντέλων, με έμφαση στις **αρχικές βιβλιογραφικές πηγές**.
- **Εμπειρικά συμπεράσματα** από τις αναλύσεις στις πιλοτικές λεκάνες.
- Διερεύνηση της καταλληλότητας των υφιστάμενων σχέσεων για την εκτίμηση **κρίσιμων δεδομένων εισόδου** της συνδυαστικής μεθόδου SCS-CN&ΣΜΥ, ήτοι:
  - Χρόνος συγκέντρωσης
  - Αριθμός καμπύλης απορροής
  - Ποσοστό αρχικών απωλειών
  - Χρόνος ανόδου και χρόνος βάσης ΣΜΥ
- **Προσαρμογή** μεμονωμένων παραμέτρων και του συνολικού πλαισίου, με βάση τα παρατηρημένα πλημμυρικά γεγονότα στις πιλοτικές λεκάνες του έργου.



# Ματιές στην (πολύ παλιά) βιβλιογραφία

## FACTORS AFFECTING THE RESPONSE OF SMALL WATERSHEDS TO PRECIPITATION IN HUMID AREAS

JOHN D. HEWLETT and ALDEN R. HIBBERT

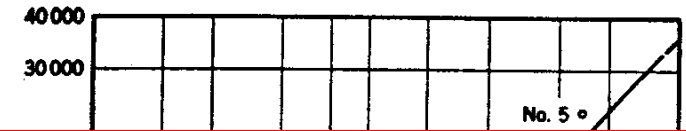
Associate Professor of Forest Hydrology, School of Forestry, University of Georgia, Athens, Georgia, and Research Forester, Coweeta Hydrologic Laboratory, Southeastern Forest Experiment Station, Forest Service, U.S. Department of Agriculture, Asheville, North Carolina

### ABSTRACT

Customary separation of stream hydrographs into overland flow, interflow and base flow has little meaning when applied to most small watersheds. A revised description of runoff processes in forested headwaters relates quick rises in streamflow to variable source areas and subsurface translatory flow, or the rapid displacement of stored water by new rain. Because this makes the classification of hydrograph components difficult, if not impossible, a numerical rating system, the response factor, was developed from precipitation and streamflow records for use in classifying the hydrologic response of small watersheds in humid areas. A simple uniform hydrograph separation method was necessary to make inter-watershed and

For example, the statement or assumption that all floods are due to surface runoff has persisted in hydrology papers and even in some hydrology textbooks despite much evidence to the contrary in forestry and agricultural research. Virtually all techniques

These areas, all located on a farm in Tennessee,



uration time and the response factor  $K_1$  and  $K_2$ ; hence it is believed that the curves are applicable to the average small agricultural area ranging in size from 1 to 200 acres.

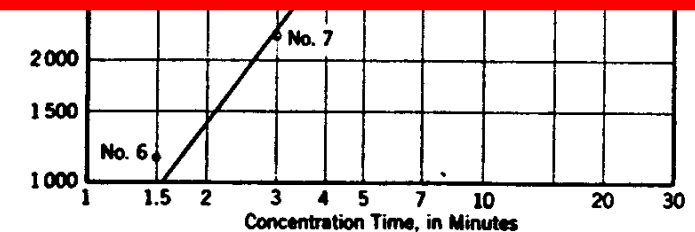


FIG. 1. CONCENTRATION TIME OF SMALL AGRICULTURAL WATERSHEDS, BASED ON  $K_1$  AS

Τυπικές θεωρίες και εμπειρικές σχέσεις της υδρολογίας πλημμυρών δέχονται έντονη κριτική ήδη από τη δεκαετία του 1960!

## ENGINEERS' NOTEBOOK

Ingenious Suggestions and Practical Data Useful in the Solution of a Variety of Engineering Problems

### Time of Concentration of Small Agricultural Watersheds

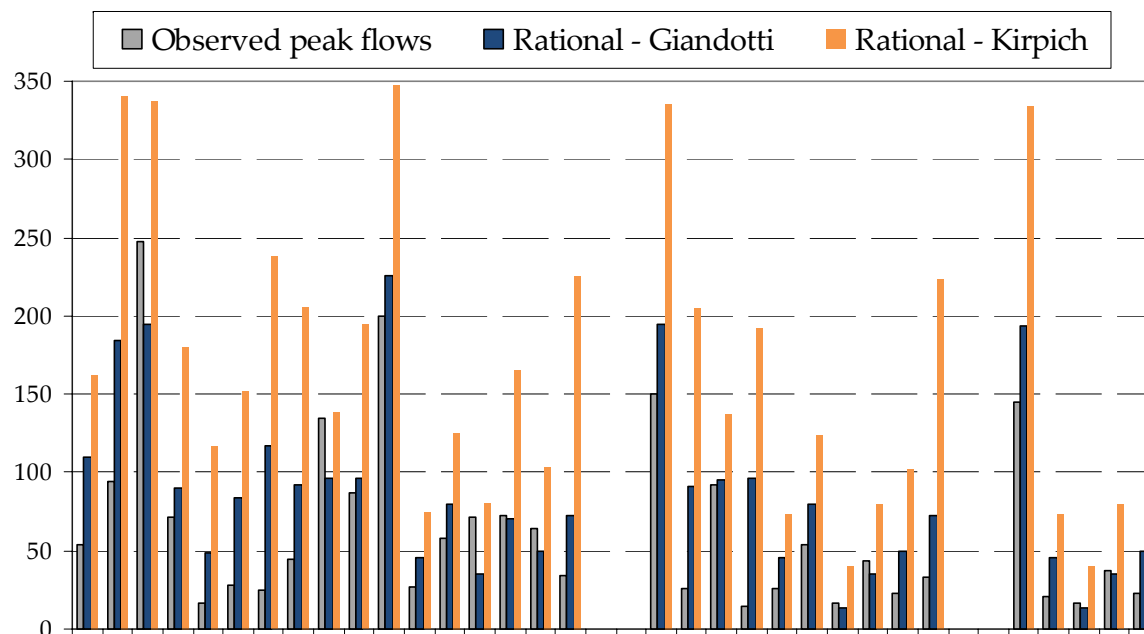
By Z. P. KIRPICH, JR., Am. Soc. C.E.

ASSISTANT HYDRAULIC ENGINEER, U.S. ENGINEER OFFICE, BALTIMORE DISTRICT, BALTIMORE, MD.



# Χρόνος συγκέντρωσης: διερεύνηση με βάση δεδομένα πλημμυρικών παροχών στην Κύπρο

- Ο χρόνος συγκέντρωσης  $t_c$  αποτελεί τη χαρακτηριστικότερη χρονική παράμετρο μιας λεκάνης, από την οποία εξαρτώνται όλα τα **χρονικά μεγέθη** μιας μελέτης πλημμυρών (χρονικό βήμα, διάρκεια βροχής σχεδιασμού, παράμετροι ΜΥ).
- Στη βιβλιογραφία διατίθενται **οκτώ τουλάχιστον διαφορετικοί ορισμοί** του  $t_c$  (McCuen, 2009), και πληθώρα μεθόδων εκτίμησής του (από απλές εμπειρικές εξισώσεις μέχρι σύνθετες υπολογιστικές διαδικασίες σε περιβάλλον ΣΓΠ).
- Από αναλύσεις δεκάδων πλημμυρικών επεισοδίων στην Κύπρο προέκυψε ότι η **εξίσωση Giandotti** είναι η μόνη που προσεγγίζει ικανοποιητικά τις μετρημένες παροχές αιχμής, σε αντίθεση με άλλες γνωστές σχέσεις (π.χ. Kirpich, SCS) που τις υπερεκτιμούν έντονα.
- Οι εκτιμήσεις βελτιώνονται αισθητά με **βαθμονόμηση** των συντελεστών των εξισώσεων.



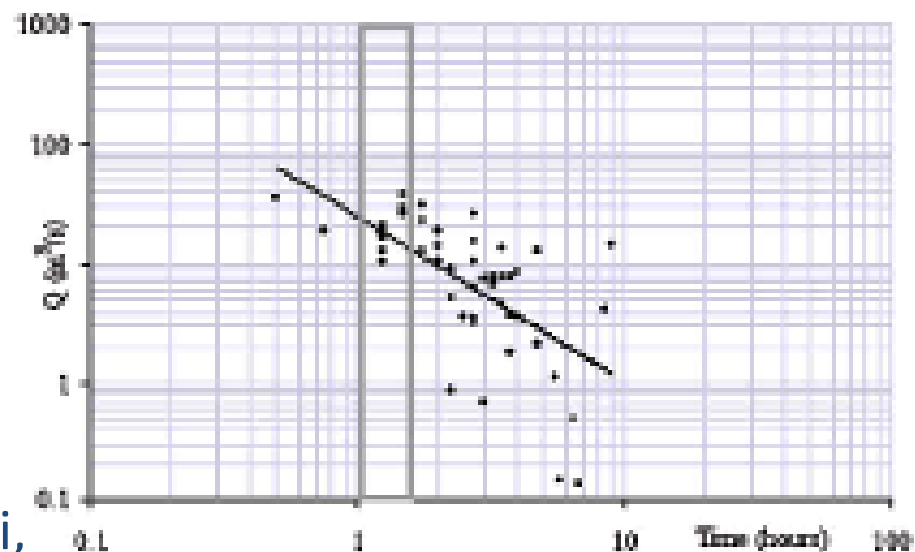


## Χειρισμός του χρόνου συγκέντρωσης ως μεταβλητή και αναγωγή του με βάση την κρίσιμη ένταση βροχής

- Από τον ίδιο τον ορισμό, καθώς και από πρόσφατα δεδομένα παρατηρήσεων, προκύπτει ότι χρόνος συγκέντρωσης  $t_c$  δεν είναι σταθερά αλλά **μεταβλητή** που εξαρτάται από την ταχύτητα κίνησης του νερού, και συνακόλουθα την παροχή  $Q$ .
- Αυξανομένης της παροχής μειώνεται ο χρόνος συγκέντρωσης, που με τη σειρά του οδηγεί στην υιοθέτηση μικρότερης διάρκειας και αυξημένης έντασης βροχόπτωσης σχεδιασμού, και άρα **περαιτέρω αύξηση της παροχής!**
- Στα πλαίσια του έργου διατυπώθηκε η εμπειρική **σχέση αναγωγής**:

$$t_c(T) = t_c \sqrt{i(5) / i(T)}$$

όπου  $i(5)$  η κρίσιμη ένταση βροχής που αντιστοιχεί σε  $T = 5$  έτη, για την οποία θεωρείται αντιπροσωπευτική η εκτίμηση του χρόνου συγκέντρωσης  $t_c$  κατά Giandotti, και  $i(T)$  η ένταση βροχής που αντιστοιχεί στην περίοδο επαναφοράς της μελέτης.



**Συσχέτιση  $t_c$  και  $Q$  στη λεκάνη Cow Bayou, Texas (Grimaldi et al., 2012)**

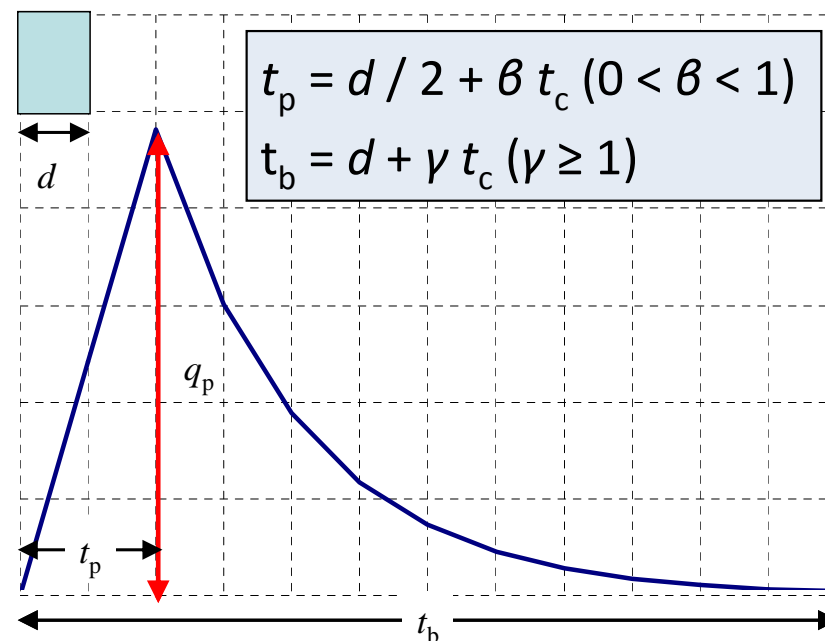




# Εκτίμηση παραμέτρων συνδυαστικής μεθόδου SCS-CN&ΣΜΥ με βάση παρατηρημένα επεισόδια πλημμύρας

- Δεδομένα εισόδου: χρονοσειρά παρατηρημένων υψών βροχής και απορροής
- Εκτίμηση καθαρού πλημμυρογραφήματος με αφαίρεση της βασικής ροής (= παροχή πριν την έναρξη της βροχής)
- Παράμετροι προβλήματος: ποσοστό αρχικών απωλειών μεθόδου SCS-CN, χρόνος ανόδου και χρόνος βάσης ΣΜΥ (γραμμικές σχέσεις του  $t_c$ , κατά Giandotti)
- Πολυκριτηριακή συνάρτηση προς βελτιστοποίηση:
  - Μέσο τετραγωνικό σφάλμα παροχών
  - Σφάλμα αναπαραγωγής της αιχμής
  - Σφάλμα χρονικής ταύτισης της αιχμής
- Φυσικός περιορισμός: όγκος ενεργού βροχής = όγκος πλημμυρογραφήματος – από τον περιορισμό εκτιμάται αναλυτικά η μέγιστη δυνατή κατακράτηση  $S$ , που συνδέεται με το CN μέσω της σχέσης:

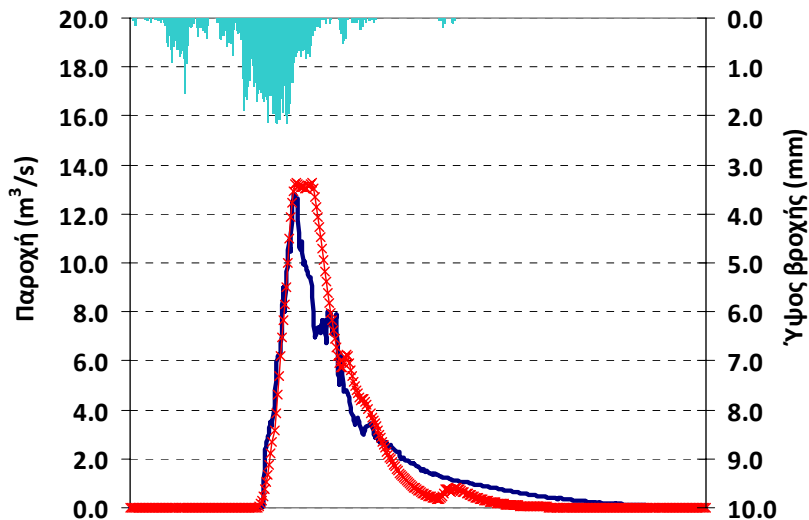
$$S = 254 (100/\text{CN} - 1)$$





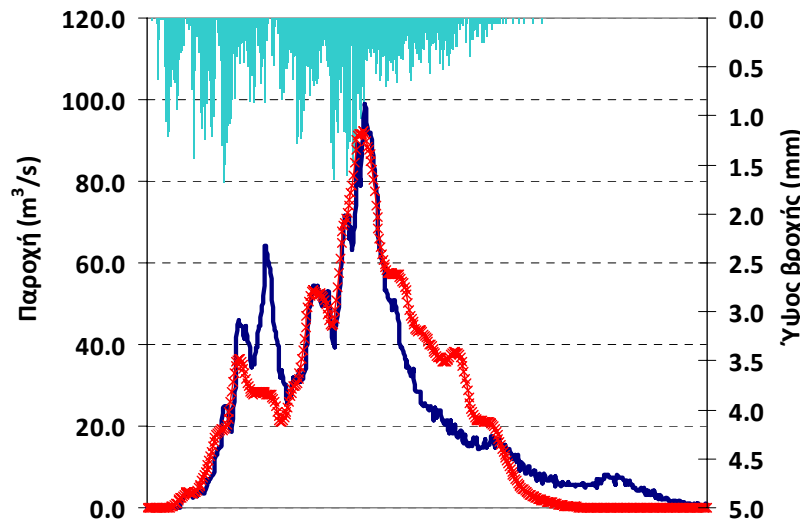
# Παραδείγματα προσαρμογής της μεθόδου SCS-CN&ΣΜΥ στις πιλοτικές λεκάνες

■ Βροχόπτωση — Παρατηρημένη παροχή — × Εκτιμημένη παροχή

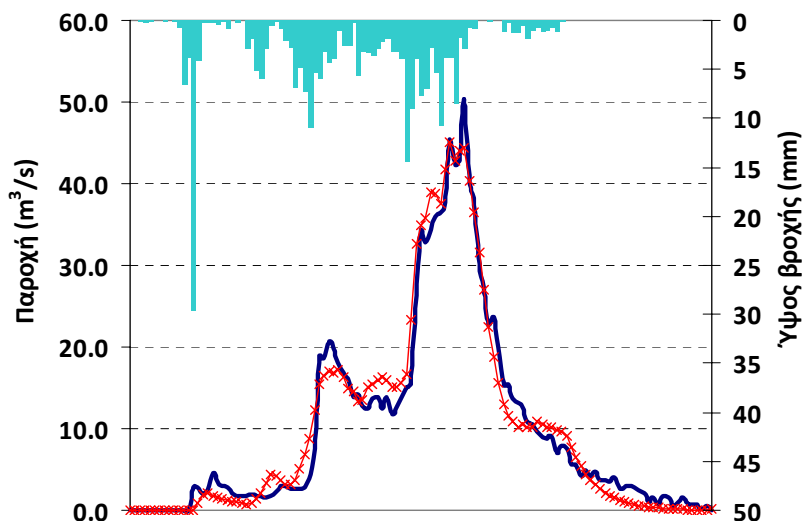


Σαρανταπόταμος, 29/12/12-2/1/13

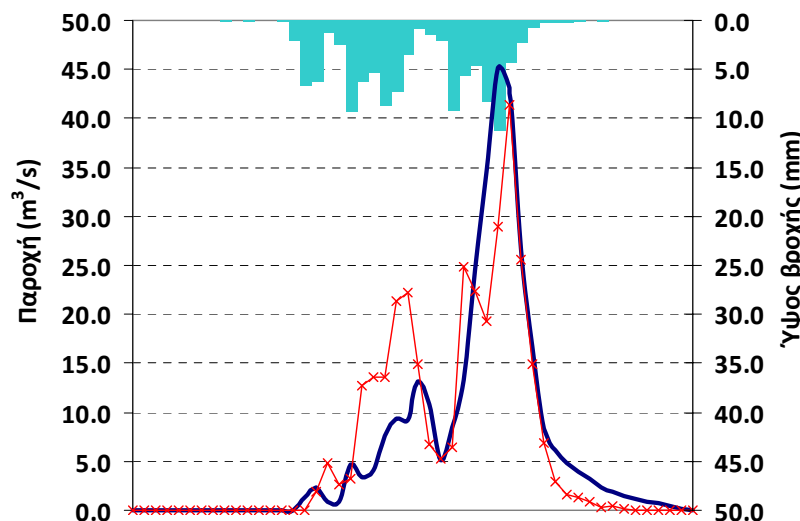
■ Βροχόπτωση — Παρατηρημένη παροχή — × Εκτιμημένη παροχή



Λούσιος, 16-21/1/13



Νέδοντας, 15-20/1/13



Ρέμα Χαλανδρίου, 22/2/13





# Χαρακτηριστικά πλημμυρικά μεγέθη και βελτιστοποιημένες παράμετροι μεθόδου SCS-CN&ΣΜΥ στο Σαρανταπόταμο

- Πλήθος επεισοδίων που εξετάστηκαν: 11
- Μέσος συντελεστής απορροής: 4.2% (επεισοδίου), 10.4% (παροχής αιχμής)
- Αρχικές συνθήκες υγρασίας: 8 επεισόδια σε συνθήκες I, 2 σε συνθήκες II, 1 σε συνθήκες III
- Μέσο ποσοστό αρχικών απωλειών: 13.2%
- Μέση τιμή CN: 52.9 (αυξάνει σε 64.2, για συνθήκες υγρασίας II και αρχικές απώλειες 20%)
- Χρονικές παράμετροι ΣΜΥ: χρόνος ανόδου =  $d/2 + 0.33 t_c$ , χρόνος βάσης =  $d/2 + 8.3 t_c$

Κωδικός επεισοδίου	12_2011	2_2012a	2_2012b	2_2012c	12_2012	1_2013	2_2013	11_2013a	11_2013b	12_2013	1_2014
Υψος βροχής (mm)	74.1	40.8	22.5	35.3	94.5	21.4	46.5	100.8	34.1	49.4	32.0
Υψος απορροής (mm)	2.2	1.6	1.3	1.3	4.2	0.7	3.4	2.6	1.6	2.2	1.0
Συντελ. απορροής επεισοδίου	0.030	0.039	0.059	0.038	0.044	0.033	0.074	0.026	0.047	0.044	0.032
Παροχή αιχμής (m <sup>3</sup> /s)	4.70	4.40	2.86	3.01	12.78	3.12	19.20	31.83	25.28	4.09	3.37
Διάρκεια βροχόπτωσης (h)	48.0	36.5	17.5	29.8	39.0	8.3	13.3	15.3	7.0	26.0	11.0
Μέση ένταση βροχής (mm/h)	1.54	1.12	1.28	1.19	2.42	2.59	3.51	6.61	4.87	1.90	2.91
Συντελ. απορροής αιχμής	0.076	0.098	0.055	0.063	0.131	0.030	0.136	0.338	0.129	0.054	0.029
Μέγιστη στάθμη (m)	0.668	0.644	0.506	0.523	1.166	0.533	1.464	1.944	1.708	0.619	0.556
Βροχόπτωση 5 ημερών (mm)	21.2	5.7	40.4	11.2	0.0	2.4	19.0	3.0	1.6	3.6	3.6
Τύπος συνθηκών υγρασίας	II	I	III	I	I	I	II	I	I	I	I
Μέγιστη κατακράτηση (mm)	1160.3	440.4	185.9	155.7	789.7	70.7	126.2	886.4	95.8	124.2	80.1
Ποσοστό αρχικών απωλειών	0.019	0.030	0.029	0.130	0.045	0.199	0.190	0.058	0.218	0.259	0.280
Παράμετρος χρόνου ανόδου ΣΜΥ	0.59	0.60	0.36	0.06	0.06	0.41	0.46	0.60	0.22	0.06	0.24
Παράμετρος χρόνου βάσης ΣΜΥ	7.65	6.48	12.31	16.08	6.68	9.85	5.03	1.11	2.68	11.12	12.00
Παράμετρος CN	18.0	36.6	57.7	62.0	24.3	78.2	66.8	22.3	72.6	67.2	76.0
CN αναφοράς	50.6	66.5	80.0	69.5	46.8	78.4	67.6	42.3	71.3	62.7	70.7



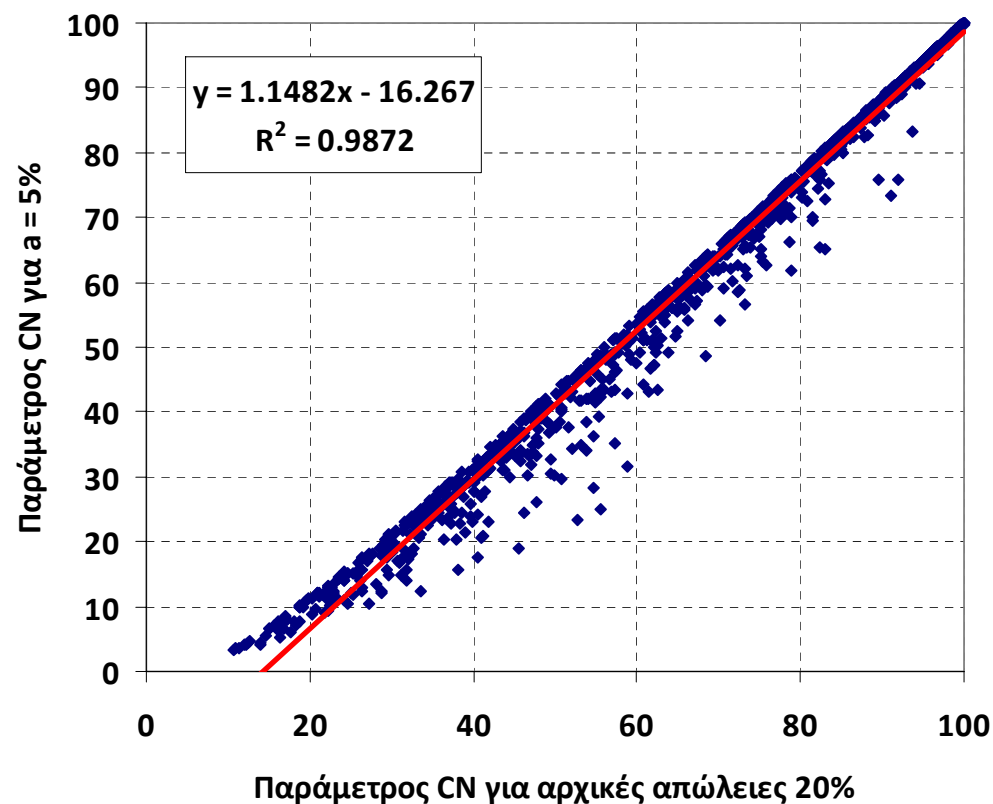
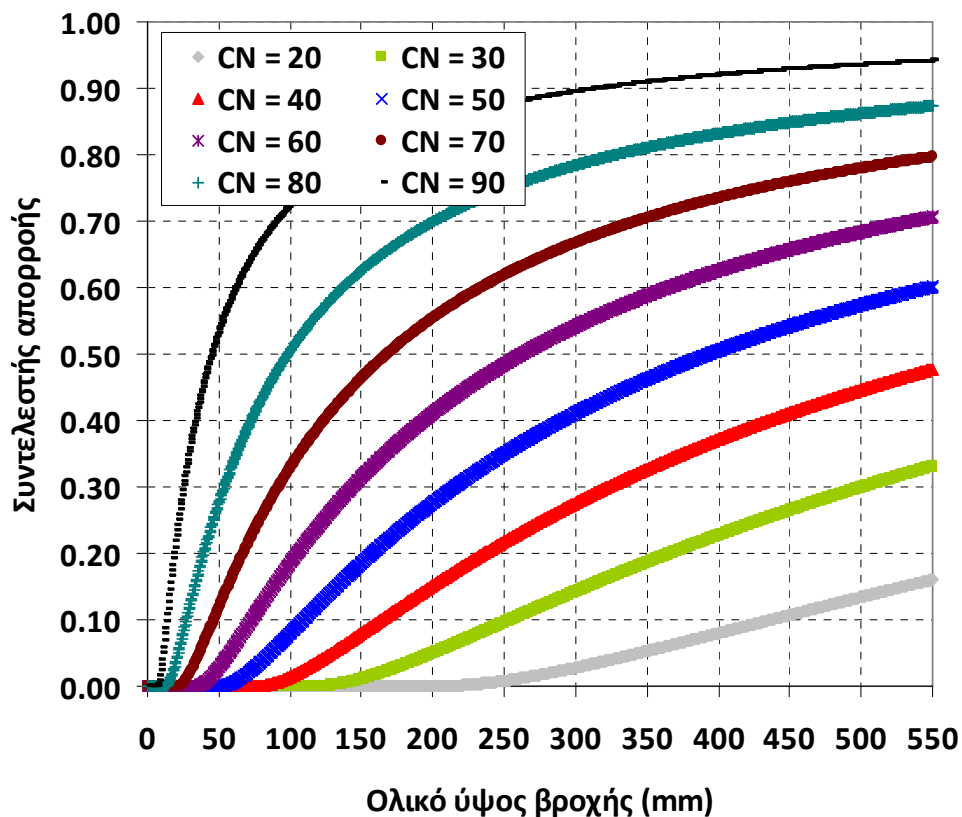
## Συμπεράσματα αναλύσεων πλημμυρικών επεισοδίων και υδρολογική τους ερμηνεία

---

- Στις περισσότερες περιπτώσεις επιτυγχάνεται καλή προγνωστική ικανότητα της μεθόδου SCS-CN&ΣΜΥ, εφόσον οι παράμετροί της προσαρμοστούν (μέσω βελτιστοποίησης) στα χαρακτηριστικά του **κάθε επεισοδίου**.
- Όσον αφορά στις επιμέρους παραμέτρους:
  - Σε όλες τις λεκάνες και σχεδόν σε όλα τα επεισόδια, το **ποσοστό αρχικών απωλειών** κυμαίνεται στα επίπεδα του **5-10%**, το οποίο έρχεται σε αντίθεση με την τυπική τιμή εφαρμογής στις μελέτες πλημμυρών (20%).
  - Η **παράμετρος CN** παρουσιάζει έντονη **μεταβλητότητα**, λόγω της ισχυρής εξάρτησής του από τις αρχικές απώλειες και τις **αρχικές συνθήκες υγρασίας**.
  - Ο **χρόνος ανόδου** του ΣΜΥ κυμαίνεται στα επίπεδα του **1/3 του χρόνου συγκέντρωσης**, καθώς έχουμε πολύ γρήγορη εμφάνιση των αιχμών.
  - Ο **χρόνος βάσης** του ΣΜΥ εμφανίζει σημαντική μεταβλητότητα, και σε κάθε περίπτωση είναι **μία τάξη μεγέθους (5-30 φορές) μεγαλύτερος του χρόνου συγκέντρωσης** κατά Giandotti, καθώς σε όλες τις λεκάνες **κυριαρχεί η υποδερμική ροή έναντι της επιφανειακής**.



# Εμβάθυνση στη μέθοδο SCS-CN: Παραγωγή τυχαίων ζευγών $(h, h_e)$ μέσω Monte Carlo προσομοίωσης



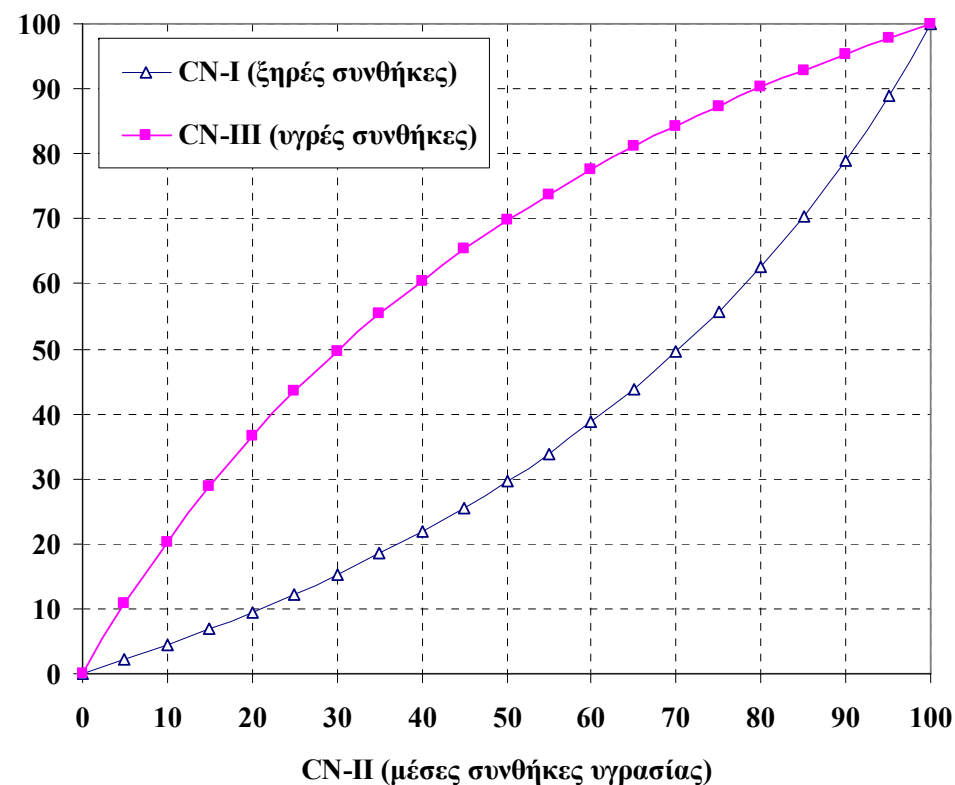
Μεταβολή συντελεστή απορροής (λόγος ενεργού,  $h_e$  προς ολική,  $h$ , βροχόπτωση) συναρτήσει του ολικού ύψους βροχής, για διάφορες τιμές του CN και αρχικές απώλειες 20%.

Διάγραμμα διασποράς παραμέτρου CN για ποσοστό αρχικών απωλειών 20% και 5%.



## Εμβάθυνση στη μέθοδο SCS-CN: Πόσο «μέσες» είναι οι μέσες συνθήκες αρχικής υγρασίας;

- Η τιμή του CN και, συνακόλουθα, τα μεγέθη του **υδρολογικού σχεδιασμού** διαφοροποιούνται δραματικά αν θεωρηθούν διαφορετικές συνθήκες υγρασίας αντί των μέσων, που υιοθετούνται στις πλείστες των περιπτώσεων.
- Σύμφωνα με τον ορισμό της SCS, οι συνθήκες υγρασίας προσδιορίζονται με βάση την **αθροιστική βροχόπτωση** των τελευταίων 5 ημερών.
- Η **πιθανότητα εμφάνισης κάθε τύπου υγρασίας** εκτιμάται με βάση ημερήσια δείγματα βροχής ικανού μήκους, εξετάζοντας τις επικρατούσες συνθήκες την ημέρα πραγματοποίησης του μεγαλύτερου ύψους βροχής κάθε έτους.
- Πιθανότητες εμφάνισης αρχικών συνθηκών τύπου I, II και III, αντίστοιχα:
  - Λόφος Νυμφών: 88.9, 9.7, 1.4%
  - Μακρυνίτσα: 44.4, 31.1, 24.5%





## Προς έναν φυσικά εδραιωμένο και στατιστικά συνεπή υδρολογικό σχεδιασμό

---

- Ως προς το **φυσικό πλαίσιο**, η πλημμύρα είναι **συνδυαστικό αποτέλεσμα**: (α) του συνολικού ύψους βροχής που δέχεται η λεκάνη, (β) της χρονικής κατανομής της καταιγίδας, και (γ) της αποθηκευμένης υγρασίας στο έδαφος.
- Ο παραδοσιακός (ντετερμινιστικός) σχεδιασμός αγνοεί την **τυχειότητα** των δύο τελευταίων παραγόντων, θεωρώντας ένα «δυσμενές» σχήμα υετογραφήματος και κάποιες «μέσες» (αλλά συχνά μη αντιπροσωπευτικές) συνθήκες υγρασίας.
- Ως αποτέλεσμα, τα μεγέθη σχεδιασμού είναι **έντονα υπερεκτιμημένα**, καθώς η πραγματική πιθανότητα εμφάνισής τους είναι πολύ μικρότερη (ενδεχομένως και τάξη μεγέθους) από την πιθανότητα πραγματοποίησης της βροχόπτωσης σχεδιασμού, όπως ορίζεται με βάση την **περίοδο επαναφοράς**.
- Ο συνεπής χειρισμός απαιτεί μοντέλα **συνεχούς υδρολογικής προσομοίωσης**, που τροφοδοτούνται από **συνθετικές χρονοσειρές βροχόπτωσης**.
- Εναλλακτικά, προτείνεται η πολύ απλούστερη προσέγγιση SCS-CN&ΣΜΥ, με χρήση συνθετικών επεισοδίων βροχής για κάθε τύπο υγρασίας, και την εκτίμηση των τελικών μεγεθών ως **συνδυασμένη πιθανότητα** των τύπων I, II και III.



## Σχετικές δημοσιεύσεις

---

- Efstratiadis, A., A. D. Koussis, D. Koutsoyiannis, and N. Mamassis, Flood design recipes vs. reality: can predictions for ungauged basins be trusted?, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 14, 1417–1428, doi:10.5194/nhess-14-1417-2014, 2014.
- Efstratiadis, A., A. Koukouvinos, P. Dimitriadis, A. Tegos, N. Mamassis, and D. Koutsoyiannis, A stochastic simulation framework for flood engineering, *5th EGU Leonardo Conference – Hydrofractals 2013 – STAHY '13*, Kos Island, Greece, European Geosciences Union, International Association of Hydrological Sciences, International Union of Geodesy and Geophysics, 2013.
- Galiouna, E., A. Efstratiadis, N. Mamassis, and K. Aristeidou, Investigation of extreme flows in Cyprus: empirical formulas and regionalization approaches for peak flow estimation, *European Geosciences Union General Assembly 2011, Geophysical Research Abstracts, Vol. 13*, Vienna, 2011, European Geosciences Union, 2011.
- Mathioudaki, M., A. Efstratiadis, and N. Mamassis, Investigation of hydrological design practices based on historical flood events in an experimental basin of Greece (Lykorema, Penteli), *Advanced methods for flood estimation in a variable and changing environment*, Volos, University of Thessaly, 2012.
- Michaelidi, E., T. Mastrotheodoros, A. Efstratiadis, A. Koukouvinos, and D. Koutsoyiannis, Flood modelling in river basins with highly variable runoff, *5th EGU Leonardo Conference – Hydrofractals 2013 – STAHY '13*, Kos Island, Greece, European Geosciences Union, International Association of Hydrological Sciences, International Union of Geodesy and Geophysics, 2013.





## Λοιπές βιβλιογραφικές αναφορές

---

- Hewlett, J.D. and Hibbert, A. R.: Factors affecting the response of small watersheds to precipitation in humid areas, *Forest Hydrology*, edited by W.E. Sopper and H.L. Lull, Pergamon, Oxford, 275–290, 1967.
- Grimaldi, S., A. Petroseli, F. Tauro, and M. Porfiri, Time of concentration: A paradox in modern hydrology, *Hydrological Sciences Journal*, 57(2), 217–228, 2012.
- McCuen, R.H., Uncertainty analyses of watershed time parameters, *Journal of Hydrologic Engineering*, 14(5), 490–498, 2009.
- Kirpich, Z. P.: Time of concentration of small agricultural watersheds, *Civil Eng.*, 10(6), 362, 1940.
- Soil Conservation Service (SCS), *National Engineering Handbook*, Section 4, Hydrology (NEH-4), U.S. Department of Agriculture, Washington, DC, 1972.